

А. В. Куртеев, С. А. Нейская, М. М. Севастьянов, О. Л. Ташлыков
Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург
Mikas45@mail.ru

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ОТВОДА ОСТАТОЧНЫХ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЙ ОТ ШАХТЫ-ХРАНИЛИЩА ОБЛУЧЕННЫХ ТОПЛИВНЫХ СБОРОК В СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

В работе изложено решение задачи, связанной с расчётом теплотерь от теплоносителя, в качестве которого используется вода, к стальным стенкам шахты-хранилища отработавших тепловыделяющих сборок и последующей передачей теплоты от стенок шахты-хранилища в бетонные стены и неограниченный грунт.

Ключевые слова: *тепловые потери; теплопередача; теплоотдача; конвективный теплообмен; перенос теплоты в неограниченном пространстве.*

A. V. Kurteev, S. A. Neyskaya, M. M. Sevastyanov, O. L. Tashlykov
Ural Federal University, Ekaterinburg

NUMERICAL ASSESSMENT OF RESIDUAL HEAT REMOVAL FROM THE SPENT FUEL ASSEMBLIES STORAGE WELL TO THE STRUCTURAL UNITS

The paper presents the solution of the problem, namely, the calculation of the heat loss from the heat transfer agent (water) to the steel walls of the spent fuel assemblies storage well and the subsequent heat transfer from the storage well walls to the concrete walls and unbounded soil.

Key words: *heat loss, overall heat transfer, surface heat transfer, convective heat exchange, heat transfer in an unbounded space.*

Шахта-хранилище предназначена для хранения отработавших тепловыделяющих сборок, завершивших свой цикл работы в реакторе ИВВ-2М, и снижения тепловыделения сборок методом выдержки в

постоянно циркулирующем теплоносителе [1]. Конструкция шахты показана на рис. 1. Бак ШХ ОТВС – представляет собой корпус прямоугольной формы. Стенки и днище бака выполнены из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т, толщина стенок $\delta_1 = 4$ мм, днища – $\delta_2 = 10$ мм [2]. Бак заглублен в бетон, снаружи которого находится грунт.

Исходные данные для решения поставленной задачи: температура теплоносителя $t_{\text{ж}} = 20$ °С; температура стенок бака шахты-хранилища $t_{\text{с}} = 19$ °С; температура бетона $t_{\text{бет}} = 8$ °С; температура поверхности теплоносителя $t_{\text{пов. ж}} = 19$ °С; температура наружного воздуха $t_{\text{наруж}} = 15$ °С; внутренние геометрические размеры бака шахты-хранилища $a = 0,815$ м, $b = 1,747$ м, $h = 5,485$ м.

1. Расчёт коэффициента теплоотдачи α от теплоносителя к стальной стенке бака при свободной конвекции

Критерий подобия Грасгофа:

$$Gr_{hж} = \frac{\beta \cdot h^3 \cdot g \cdot (t_{\text{ж}} - t_{\text{с}})}{\nu^2}, \quad (1)$$

где β – температурный коэффициент объёмного расширения, K^{-1} .

Для воды при $t = 20$ °С – $\beta = 1,82 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$; g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; ν – коэффициент кинематической вязкости воды, при $t = 20$ °С величина $\nu = 1,00341 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

$$Gr_{hж} = \frac{1,82 \cdot 10^{-4} \cdot 5,485^3 \cdot 9,81 \cdot (20 - 19)}{(1,00341 \cdot 10^{-6})^2} = 2,926 \cdot 10^{11}$$

Критерии подобия Прандтля для воды при $t = 20$ °С и для стальной стенки при $t = 19$ °С равны соответственно: $\text{Pr}_{\text{ж}} = 6,991$; $\text{Pr}_{\text{с}} = 7,187$.

Число Релея:

$$Ra = Gr_{hж} \cdot \text{Pr}_{\text{ж}} = 2,923 \cdot 10^{11} \cdot 6,991 = 2,0457 \cdot 10^{12}, \quad (2)$$

$Ra > 10^9$, следовательно, режим течения – турбулентный.

Число Нуссельта при свободной конвекции для турбулентного режима:

$$Nu_{hж} = 0,15 \cdot Ra^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25} = 0,15 \cdot (2,0457 \cdot 10^{12})^{0,33} \cdot \left(\frac{6,991}{7,187} \right)^{0,25} = 1720,5663$$

Коэффициент теплоотдачи по формуле:

$$\alpha = \frac{Nu_{hж} \cdot \lambda_{жс}}{h}, \quad (4)$$

где $\lambda_{жс}$ – коэффициент теплопроводности воды, $\lambda_{жс} = 0,597$ Вт/(м·град)

$$\alpha = \frac{1720,563 \cdot 0,597}{5,485} = 187,27 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}.$$

2. Расчёт тепловых потерь от стенок бака в бетон

Величина термического сопротивления стальных стен и дна шахты-хранилища соответственно равны:

$$R_{стен} = \frac{\delta_1}{\lambda_{ст}} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{15,5} = 2,6 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{с}}{\text{Вт}} \quad (5)$$

$$R_{дна} = \frac{\delta_2}{\lambda_{ст}} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{15,5} = 6,45 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{с}}{\text{Вт}}, \quad (6)$$

где $\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности стали, из которой изготовлен бак шахты-хранилища.

Для расчета термического сопротивления бетона подземная часть шахты-хранилища может быть представлена в виде параллелепипеда размерами $a \times b$, заглубленного в бетон на глубину h . Термическое сопротивление бетона в такой конструкции и соответствующие теплопотери рассчитывают отдельно для горизонтальной части размером $a \times b$, расположенной в полуограниченном массиве с теплопроводностью $\lambda_{бет}$ (рис. 2а) термическим сопротивлением $R_{обл.дна}$ [3], при известной температуре бетона, определяемым по формуле:

$$R_{обл.дна} = \frac{1}{4 \cdot \lambda_{бет}} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{F_{пола}}}, \quad (7)$$

где $\lambda_{бет} = 1,28$ Вт/(м·град),

$$R_{обл.дна} = \frac{1}{4 \cdot 1,28} \cdot \sqrt{\frac{3,14}{0,815 \cdot 1,747}} = 0,2918 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{с}}{\text{Вт}}.$$

Термическое сопротивление бетона между стенкой и атмосферой в форме пластины $R_{обл.стен}$, погруженной в грунт на глубину h_1 (рис. 3), при известной наружной температуре поверхности $t_{наруж}$, определяемым по формуле [2]:

$$R_{обл.стен} = \frac{t_1 - t_2}{q} = \frac{k \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot h}{2 \cdot h_1}\right)}{k \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot h}{2 \cdot h_1}\right)} = f\left(\frac{h}{h_1}\right) \quad (8)$$

где, согласно [4], выражение $K \cdot \sin \alpha$ есть полный эллиптический интеграл, величину которого можно найти по таблицам специальных функций [5, с. 68],

$$\delta_{усл} = f(h/h_1),$$

где $\delta_{усл} = \lambda_{бет} \cdot R_{обл.стен}$.

Теплопотери в днище шахты-хранилищ, Вт

$$Q_{днища} = F_{днища} \cdot (t_{жс} - t_{бет}) \cdot \frac{1}{R_{дна} + R_{обл.дна}}, \quad (9)$$

$$Q_{днища} = 0,815 \cdot 1,747 \cdot (20 - 8) \cdot \frac{1}{6,45 \cdot 10^{-4} + 0,2918} = 57,79 \text{ Вт}.$$

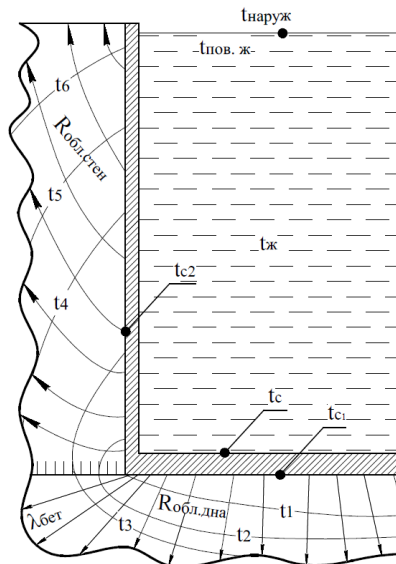


Рис. 1. Расчётная схема бака шахты-хранилища, с указанием изотермических поверхностей $t_1 - t_6$, снаружи которого во всех направлениях залит слой бетона

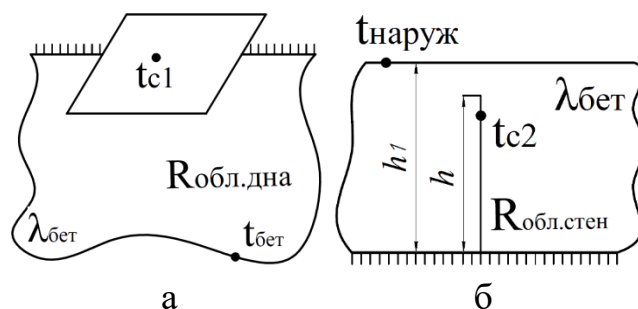


Рис. 2. а – расчётная схема дна бака шахты-хранилища, заглублённого в бетон, представляющий собой полубесконечный массив, ограниченный сверху адиабатической поверхностью; б – расчётная схема стен бака шахты-хранилища высотой h , заглубленных в бетон в виде бесконечной пластины высотой h_1 и ограниченной снизу адиабатической поверхностью

Условная толщина бетона в зависимости от величины заглубления h/h_1 стальных стен в бетон, м

$$\delta_{\text{усл}} = 0,14 \text{ м.}$$

Условная толщина бетона меньше толщины бетонных стен [6], следовательно, процесс теплообмена не зависит от теплофизических свойств грунта.

Термическое сопротивление грунта между стенкой и атмосферой в форме пластины погруженной на глубину h_1 , $(\text{м}^2 \cdot \text{град})/\text{Вт}$ (рис. 2б)

$$R_{\text{обл.стен}} = \frac{\delta_{\text{усл}}}{\lambda_{\text{бет}}} = \frac{0,14}{1,28} = 0,109 (\text{м}^2 \cdot \text{град})/\text{Вт}. \quad (10)$$

Общее термическое сопротивление стальных стен и бетона, $(\text{м}^2 \cdot \text{град})/\text{Вт}$

$$R_{\text{стен.общ}} = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha_{\text{возд}}} + R_{\text{обл.стен}} + R_{\text{стен}}, \quad (11)$$

где $\alpha_{\text{возд}}$ – коэффициент теплоотдачи от поверхности бетона к воздуху, $\alpha_{\text{возд}} = 9,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$,

$$R_{\text{стен.общ}} = \frac{1}{187,27} + \frac{1}{9,4} + 0,109 + 2,6 \cdot 10^{-4} = 0,221 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{град}}{\text{Вт}}.$$

Теплопотери стен бака шахты-хранилища

$$Q_{стен} = \frac{P \cdot h \cdot (t_{ж} - t_{наруж})}{R_{стен.общ}} = \frac{2 \cdot (0,805 + 1,747) \cdot 5,485 \cdot (20 - 15)}{0,221} = 632,357 \text{ Вт} \quad (12)$$

Теплопотери стен и дна бака, Вт

$$Q_{общ} = Q_{днища} + Q_{стен} = 57,79 + 632,357 = 690,055 \text{ Вт}. \quad (13)$$

Таким образом, на примере начальных исходных данных было найдено значение термического сопротивления стен и пола бака реактора. Аналогичные расчёты, но уже при других исходных данных, были проведены в среде MS Excel. Результаты проведённых расчётов следующие: при разнице температур между теплоносителем и бетоном от $\Delta t_1 = 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $\Delta t_2 = 87 \text{ }^{\circ}\text{C}$ теплопотери в дно шахты-хранилища принимают значения соответственно от $Q_{пола\ 1} = 57,7 \text{ Вт}$ до $Q_{пола\ 2} = 418,31 \text{ Вт}$; теплопотери в стены шахты-хранилища от $Q_{стен\ 1} = 632,36 \text{ Вт}$ до $Q_{стен\ 2} = 10317,98 \text{ Вт}$; общие теплопотери стен и дна от $Q_{общ\ 1} = 690,06 \text{ Вт}$ до $Q_{общ\ 2} = 10736,29 \text{ Вт}$.

Список использованных источников

1. Шумков Д. Е., Климова В. А., Ташлыков О. Л., Селезнев Е. Н. Повышение надежности охлаждения облученных топливных сборок ИЯР ИВВ-2М в шахтехранилище // Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2017 : тезисы докладов IV Международной молодежной научной конференции (Секции 3, 4, 5). Екатеринбург : УрФУ, 2017. С. 122–123.
2. Литвинов Д. Н., Севастьянов М. М., Шумков Д. Е., Климова В. А., Ташлыков О. Л. Исследование эффективности отвода остаточных тепловыделений облученных топливных сборок в шахте-хранилище исследовательского реактора // Материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвящ. памяти проф. Данилова Н. И. (1945–2015) – Даниловских чтений (Екатеринбург, 11–15 декабря 2017 г.). Екатеринбург : УрФУ, 2017. С. 842–845.
3. Пехович А. И., Жидких В. М. Расчеты теплового режима твердых тел, изд. 2-е, перераб. и доп. Л. : Энергия, 1976. 350 с.
4. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена, изд. 4-е. Новосибирск : Наука, 1970 ; изд. 5-е, перераб. и доп. М. : Атомиздат, 1979. 416 с.
5. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. М. : Наука, 1986. 544 с.
6. Литвинов Д. Н., Севастьянов М. М., Шумков Д. Е., Ташлыков О. Л., Климова В. А. Исследование надёжности теплоотвода при естественной и принудительной циркуляции в шахте-хранилище исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М // Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2018 : тезисы докладов V Международной молодежной научной конференции (Секция 5). Екатеринбург : УрФУ, 2018. С. 15–16.